DOI:10.11776/j.issn.1000-4939.2025.01.007

填料蠕变性能对高填方明洞减载效果的时效性分析

王昱杰[1],李盛[1],贾聂宇驰[1],马莉[1],王长丹[2]

(1. 兰州交通大学土木工程学院,730070 兰州;2 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,201804 上海)

摘　要:为明确高填方明洞采用相对低压实黄土(relatively low-compacted loess,RLC)减载时,回填材料蠕变性能对明洞上方土压力的影响。利用有限差分软件 FLAC3D,分析了填料蠕变性能显著(黄土)和不显著(砂砾石)时,RLC 减载层所发挥的减载作用,同时进一步研究了 RLC 减载层宽度、高度和位置的变化对高填方明洞上方的竖向土压力的长期影响。研究结果表明,填料的蠕变性能对 RLC 减载层减载效果的时效性影响显著,在蠕变性能不显著的填料中,RLC 减载层可以发挥更好的减载效果。填料回填完成时,RLC 减载层通过增加明洞顶部的填料相对竖向位移来有效减小明洞顶的竖向土压力。工后,若填料为黄土,RLC 减载层及填料的沉降均随时间不断增加,洞顶土压力会随时间增大,RLC 减载效果随时间减弱;若填料为砂砾石,仅 RLC 减载层的变形会随时间增加,洞顶土压力随时间减小,RLC 减载能力随时间增大。另外,RLC 减载层的几何参数变化对高填方明洞上方土压力的长期影响与填料的蠕变性能密切相关,且存在最优值。以上结果对高填方明洞的长期减载有一定的参考价值。

关键词:高填方;相对低压实黄土;减载效应;数值模拟;蠕变;黄土;砂砾石

中图分类号:TU43　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-4939(2025)01-0071-10

The influence analysis of the creep properties of backfill soil on the load reduction effect of high-filled cut-and-cover tunn

WANG Yujie[1], LI Sheng[1], JIANIE Yuchi[1], MA Li[1], WANG Changdan[2]

(1. Civil Engineering College, Lanzhou Jiaotong University, 730070 Lanzhou, China;
2. Key Laboratory of Road & Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, 201804 Shanghai, China)

Abstract: We aimed to study the influences of creeping properties of different backfill materials on the earth pressure above the high-filled cut-and-cover tunnel (HFCCT) that adopted the relatively low-compacted loess (RLC) as the load reduction method. The FLAC3D (fast lagrangian analysis of continua) was used to establish numerical models of HFCCT to analyze the RLC reduction effects when the creep properties of the backfill materials were significant (loess) and insignificant (dry sandy gravel) respec-

收稿日期:2021-11-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51668036; 51868041);甘肃省基础研究创新群体资助项目(No. 21JR7RA347);甘肃省科技计划资助(No. 21YF5GA050);甘肃省教育厅产业支撑计划资助项目(No. 2021CYZC-28)
通信作者:李盛,教授。E-mail:ligwin@126.com
引用格式:王昱杰,李盛,贾聂宇驰,等. 填料蠕变性能对高填方明洞减载效果的时效性分析[J]. 应用力学学报,2025,42(1):71-80.
WANG Yujie, LI Sheng, JIANIE Yuchi, et al. The influence analysis of the creep properties of backfill soil on the load reduction effect of high-filled cut-and-cover tunn[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(1):71-80.

tively. At the same time, the influences of the related parameters variations (the width of RLC, the height of RLC and the location of RLC) on the vertical earth pressure above the HFCCT were further investigated. The results show that the load reduction effect of RLC is different under different backfill materials. The RLC load reduction can exert a better load reduction effect in fillers with insignificant creep properties. When backfill works are completed, the load reduction effect of RLC is activated by generating the relative vertical displacement difference between the backfill materials above the HFCCT and the both sides of HFCCT. After construction, if the backfill material is loess with significant creeping property, the displacement of the RLC and backfill material increases over time, the vertical earth pressure above HFCCT also increases over time, which indicates the load reduction effect of RLC gradually decreases. If the creep property of backfill material is insignificant, the displacement of RLC still increases over time, but the vertical earth pressure above HFCCT decreases over time, which suggests the load reduction effect increases. In addition, the long-term effect of changes in the geometric parameters of the RLC on the earth pressure above the HFCCT is closely related to the creeping properties of the backfill materials, which has an optimal value. The above results have certain reference value for the long-term load reduction of HFCCT

Key words: high filling; relatively low-compacted loess (RLC); load reduction effect; numerical simulation; creep; loess; dry sandy gravel

平山填沟造地缓解了西北黄土高原城市及交通建设用地的紧张局面,同时也出现了一些采用黄土回填的高填方明洞。相对于高填方明洞,高填方涵洞更早地受到了关注。MARSTON 等[1-2]对地下涵管的力学行为进行理论推导和试验,发现在结构上方铺设一定厚度的压缩性强于周围填土的材料(相对高压缩性材料)后,涵管结构上方土中应力重新分布,土拱效应出现,结构上方部分荷载经土拱向两侧土体内转移,结构所受荷载减小。之后,众多学者使用稻草[3-4]、木屑[5]、泡沫板[6]等不同相对高压缩性材料对涵洞进行减载,均发现可以起到减载效应。

然而,以上研究结果均建立在不考虑时间因素的前提下。对于填料长期作用下的涵洞,国外学者已经进行了大量的研究。SPANGLER[7]对以砂质土(含砂砾及少量轻质黏土)回填的混凝土、铸钢和波纹钢涵洞进行了21年的长期监测,发现三涵管所受荷载随时间并未发生实质上的改变。VASLESTAD 等[8]分别对由不同材料组成的管涵进行填方试验,发现采用岩石进行高填方后,各管涵所受荷载在随后的3年间均未随时间发生显著变化。SUN 等[9]对回填填料为残余黏土的现浇钢筋箱型涵洞进行了5年的监测研究,发现涵洞顶、底部应变随时间有所增加。

对于采用黄土回填的高填方明洞而言,明洞结构所受的土压力同样与填料的变形密切相关。而黄土会发生明显的蠕变,葛苗苗等[10-12]通过研究证实了高填方黄土会产生长期蠕变沉降,且长期蠕变沉降与黄土的含水率、压实度以及填方高度有关,并发现了 Burgers 模型更适合描述高填黄土的长期蠕变。对于填料长期蠕变下的高填方明洞,李盛等[13-16]通过试验和数值模拟的方法,研究了未采用任何减载措施时,高填方明洞的土压力及结构内力分布规律,并且推导出特定条件下高填方明洞土压力的计算方式,同时发现了随着蠕变时间的增加,明洞上方的黄土填料变形增大,明洞结构所受的竖向土压力增大。为了减小明洞结构所受的土压力,国内外的研究者对在高填方明洞上方采用相对低压实土(relatively low-compacted loess, RLC)减载已经进行了大量的研究,并且取得了一定的成果。LI 等[17]在黄土填料回填完成时,通过细观颗粒流软件 PFC2D 研究了明洞上方竖向土压力相对于 RLC 减载层高度、宽度、槽宽与明洞宽度的比值和边坡角度的变化。LI 等[17]的研究仅对黄土填料回填完成时的 RLC 减载层的减载作用做了研究,缺少长期蠕变以及不同蠕变性能的填料对 RLC 减载层减载作用的影响。

因此,本研究将高填方减载明洞的填料分为黄土(蠕变性能显著)和砂砾石(蠕变性能不显著),采用有限差分软件 FLAC3D 进行蠕变模拟,研究了填料的蠕变性能对采用 RLC 减载层的高填方明洞所受的竖向土压力的影响。同时,基于该减载体系,进一步研究 RLC 减载层的宽度、高度和位置3种参数的变化对高填方明洞所受的竖向土压力的长期影

响。以期为高填方明洞的长期使用提供参考数据。

1　模型的建立以及参数的获取

1.1　有限差分程序数值模型建立

为了研究填料的蠕变性、RLC 减载层和蠕变时间对高填方明洞土压力以及位移的影响,共建立 6 种工况,具体工况方案如表 1 所示。其中,W1 ~ W3 填料为蠕变性能显著的黄土;W4 ~ W6 填料为蠕变性能不显著的砂砾石;RLC 减载层为蠕变性能显著的低压实黄土。通过对比 W1 ~ W3,得到同时考虑黄土填料和 RLC 减载层蠕变时,填土完成后不同时间段的明洞土压力及位移的变化;通过对比 W4 ~ W6,得到仅考虑 RLC 减载层蠕变时,填土完成后不同时间段的明洞土压力及位移的变化。经过对这几种工况的分析和对比,最终得到填料蠕变性能对高填方明洞减载前后土压力和位移的影响。

表 1　工况参数表(W1 ~ W6)

Tab. 1　Parameters of working conditions (W1 ~ W6)

工况	填料	填料的蠕变性	是否 RLC 减载	蠕变时间/d
W1	黄土	显著	否	0
W2	黄土	显著	是	0
W3	黄土	显著	是	8 000
W4	砂砾石	不显著	否	0
W5	砂砾石	不显著	是	0
W6	砂砾石	不显著	是	8000

本研究利用 FLAC3D(有限差分软件)建立高填沟槽式明洞相应的有限差分数值模型。由于 6 种工况的模型建立方式相似,此处仅对 W2 的模型进行描述,如图 1 所示,模型水平向取 101 m,竖向取 109 m;回填材料高为61 m,明洞上方的填料共分为 6 层,第 1、2 层填料高为 5 m,其余各层的填料高为 10 m;明洞宽为 12.8 m,高为 11 m;边坡的夹角为 70°,两侧边坡之间的距离为 25.6 m。明洞顶设置的 RLC 减载层,其宽度(W)、高度(H)以及距离明洞顶的位置(D)可随计算需要进行该改变。模型建立完成后,底部施加位移全约束,顶部不施加任何约束,四周约束法向位移。

模型建立完成后,给模型赋予相应的参数,进行地应力平衡。平衡完毕后,清除产生的土体位移,开始填方计算。对于填方,明洞上方共设置有 6 层填料,通过将每层填料从空模型(Null)变为实体本构模型的方式,进行分层填筑模拟,避免采用一次性填筑造成的计算误差。当模型中填料蠕变 8 000 d 后,明洞侧壁底部之间的水平位移和明洞拱顶的沉降每天修正分别为 0.03 mm 和 0.002 mm,均小于《铁路隧道施工规范》[18] 规定值(0.2 mm/d,0.15 mm/d),因此模型蠕变计算时间定义为 8 000 d。

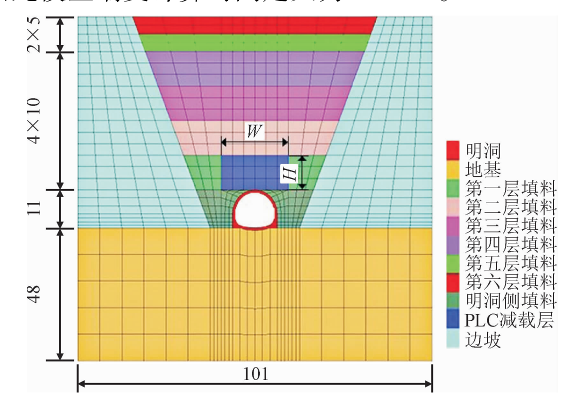


图 1　高填方明洞减载模型(单位:m)

Fig. 1　Model of load reduction for HFCCT(unit:m)

1.2　模型材料参数的确定

张豫川等[11] 的研究成果表明,压实黄土的应变与时间呈现非线性的关系,Burgers 模型拟合的长期蠕变曲线精度更高。因此,本研究采用 Burgers 模型来模拟高填黄土的长期蠕变。Burgers 模型如式(1)所示

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_{\mathrm{M}}} + \frac{\sigma_0}{\eta_{\mathrm{M}}}t + \frac{\sigma_0}{E_{\mathrm{K}}}\left[1 - \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{K}}}{\eta_{\mathrm{K}}}t\right)\right] \quad (1)$$

式中:ε 为应变;t 为时间;σ_0 为初始应力;E_{M} 为 Maxwell 体中弹簧元件弹性模量;E_{K} 为 Kelvin 体中弹簧元件弹性模量;η_{M} 为 Maxwell 体中黏壶元件黏滞系数;η_{K} 为 Kelvin 体中黏壶元件黏滞系数。

1.2.1　黄土填料的蠕变参数获取

本研究采用含水率为 15.7%,压实度为 0.96 的黄土作为蠕变性能显著的回填材料,其 Burgers 模型蠕变参数拟合值[11] 如表 2 所示。由于 Burgers 模型中的各个参数会随着初始应力的变化而变化,所以需要确定出更为精确的初始应力。本研究确定精确初始应力的步骤为:①将各层土的自重定义为初始应力,将对应的 Burgers 模型参数分配给应的各填土层;②利用 FLAC3D 进行运算,得到回填完成时的垂直土压力;③将得到的回填完成时的垂直土压力定义为初始应力,参照表 2 的数据利用插值法得到初始应力相对应的蠕变参数,并重新分配给相应的填

土层后,用FLAC3D重新进行运算得到新的垂直土压力;④比较②和③中用FLAC3D运算后得到的垂直土压力,如果土压力差值小于5%,则③中的垂直压力定义为初始应力;若不小于5%,重复②跟③,直到土压力差值小于5%即可。

表2 $w=15.7\%$、$k=0.96$ 时Burgers模型参数

Tab.2 Parameter of Burgers model($w=15.7\%$、$k=0.96$)

σ/kPa	E_M/MPa	E_K/MPa	η_M/(MPa·h)	η_K/(MPa·h)	R^2
100	10.49	53.41	3 672.22	17.65	0.974 1
200	11.11	96.16	7 628.26	39.65	0.974 0
400	13.36	85.49	14 775.71	33.10	0.978 3
800	14.96	74.40	12 002.48	8.91	0.965 0
1 200	15.54	99.35	23 847.24	23.18	0.967 6
1 600	16.51	165.47	59 164.77	136.43	0.987 7

1.2.2 砂砾石填料的参数获取

本研究采用MEGUID等[19]研究中的砂砾石作为蠕变性能不显著的回填材料,这种砂砾石是由77%的砾石和23%的沙子组成,以Mohr-Coulomb模型描述该砂砾石的力学行为,其对应参数如表3所示。

表3 Mohr-Coulomb砂砾石参数表

Tab.3 Parameter of dry sandy gravel (Mohr-Coulomb)

材料	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	扩张角/(°)	黏聚力/MPa	容重/(kN·m^{-3})
砂砾石	150	0.3	47	15	0	16.28

1.2.3 RLC减载层的蠕变参数获取

RLC减载层采用含水率为15.7%,压实度为0.85的黄土,其Burgers模型参数拟合值[11]如表4所示。其精确的初始应力的确定方法和蠕变填料为黄土时的各填土层的初始应力的确定方法相同。

表4 $w=15.7\%$、$k=0.85$ 时Burgers模型参数

Tab.4 Parameter of Burgers model($w=15.7\%$、$k=0.85$)

σ/kPa	E_M/MPa	E_K/MPa	η_M/(MPa·h)	η_K/(MPa·h)	R^2
100	12.44	80.70	2 843.78	234.98	0.993 4
200	13.09	102.80	4 551.93	24.75	0.988 2
400	11.42	87.91	7 639.23	32.78	0.959 9
800	11.56	78.05	20 771.30	10.33	0.979 7
1 200	11.79	99.37	30 498.90	38.78	0.974 4
1 600	14.01	137.12	37 779.30	16.65	0.970 6

1.2.4 其他材料的参数获取

由于高填方明洞基础的后期变形很小,同时,明洞结构采用钢筋混凝土,边坡为老黄土。故不需要考虑其蠕变因素,基础采用Mohr-Coulomb模型,明洞及两侧边坡采用线弹性模型,参数如表5所示。

表5 Mohr-Coulomb其余材料参数

Tab.5 Parameters of other materials (Mohr-Coulomb)

材料	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	容重/(kN·m^{-3})
明洞	3×10^4	0.167	—	—	24
基础	4×10^3	0.250	78	32	22
边坡	4×10^3	0.200	—	—	20

1.3 测点的布置

在蠕变计算过程中,需要根据所研究的内容对模型进行测点的布置,测点布置图以W2为例。如图2所示,*A-A*截面和*B-B*截面均布置21个测点,*C-C*截面布置71个测点,每个测点间隔1 m。*A-A*截面测点主要用于测量明洞顶范围土压力的变化趋势;将*A-A*截面测点的中心点定义为点*a*,用来测量明洞顶部中心点处竖向土压力随时间的变化规律;*B-B*截面测点用于测量RLC减载层顶部的位移;*C-C*截面用于测量地表位移。

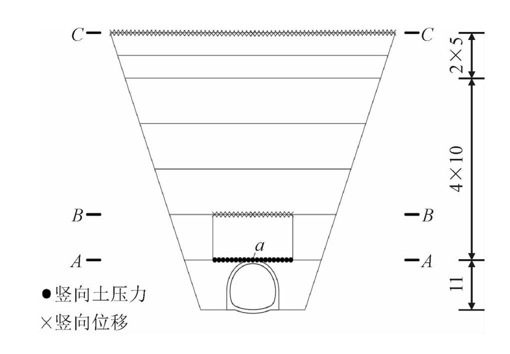


图2 测点布置图(单位:m)

Fig.2 Layout of measuring points(unit:m)

2 计算结果及其分析

2.1 土压力

2.1.1 回填填料的竖向土压力

回填填料的竖向土压力云图如图3所示,图3(a)~图3(f)分别对应W1~W6。

对于黄土填料,图 3(b)相比较于图 3(a),明洞上方的应力有微小的减小,这表明在黄土填料回填完成时,RLC 减载层对明洞顶部起到了减载作用。比较图 3(c)和图 3(b),蠕变完成后,各层竖向土压力趋于平稳,表明随着蠕变的完成,RLC 减载层在黄土填料中的减载作用消失。同样的,对于砂砾石填料,图 3(e)相比较于图 3(d),明洞顶部的应力集中区域明显增多,土压力减小,这表明采用砂砾石填料回填,RLC 减载层对明洞顶部起到的减载作用极为明显。比较图 3(f)和图 3(e),明洞顶的应力集中区域进一步增多,说明随着蠕变的稳定,RLC 减载层在砂砾石填料中的减载作用继续增加。由以上规律可看出,RLC 减载层对于砂砾石填料的长期减载效果更好。

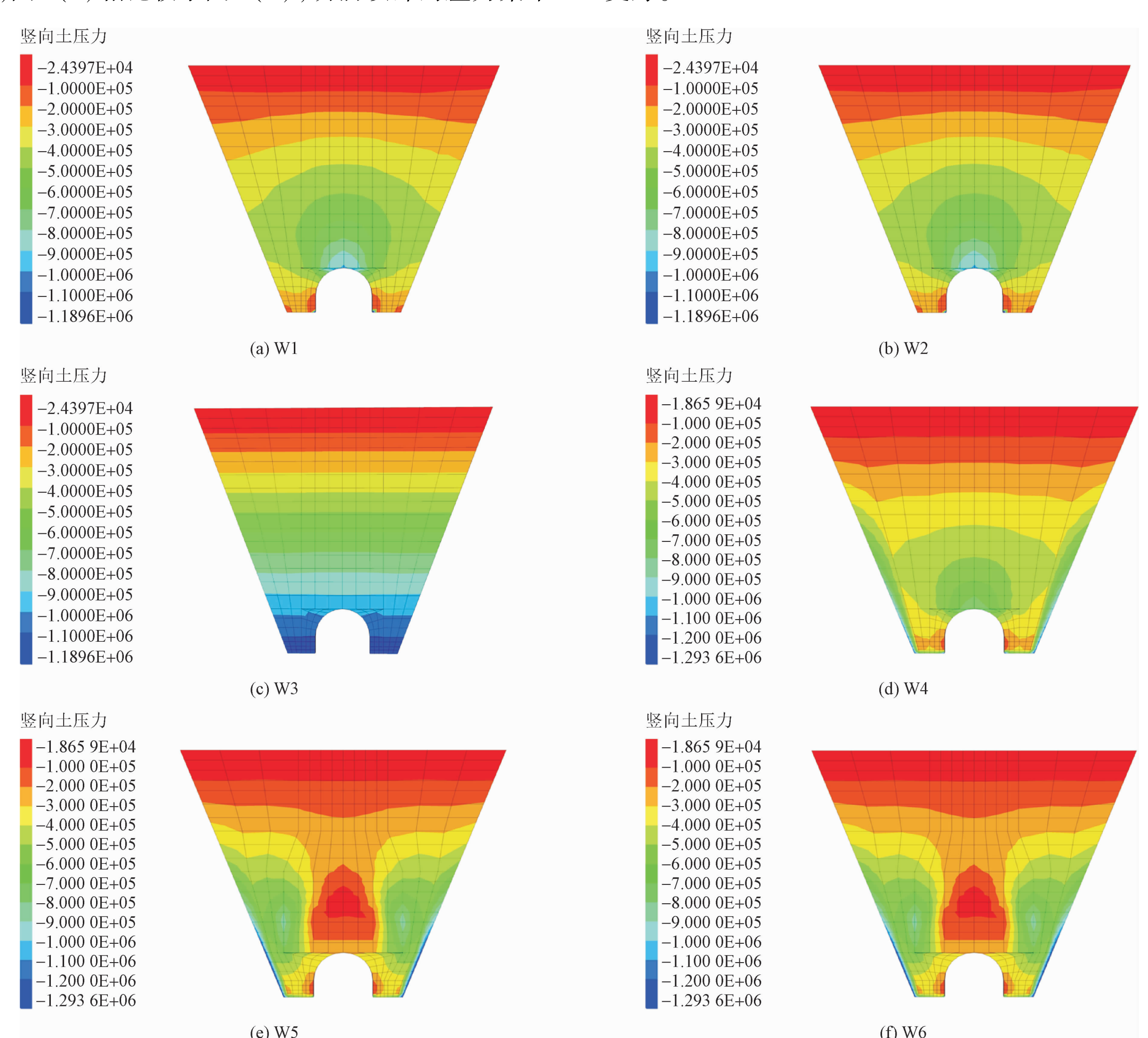


图 3　竖向土压力分布云图(单位:Pa)

Fig. 3　Cloud diagrams of vertical earth pressure(unit:Pa)

2.1.2　明洞上方的竖向土压力

W1 ~ W6,*A*-*A* 截面的竖向土压力分布规律如图 4 所示。

由图 4 可知,对于黄土填料,由于明洞顶竖向土压力集中,所以,W1、W2 的明洞顶竖向土压力曲线呈倒“V”形。对于 W1,竖向土压力值在明洞洞顶位置处达到最大值 964 kPa,并且从中心向两边递减。对于 W2,曲线与 W1 相似,但整体小于 W1,在明洞洞顶位置处较 W1 降低了 13.17% 。当蠕变稳定后,W3 的竖向土压力值回升且曲线趋于平缓。

对于砂砾石填料,W4 的竖向土压力曲线呈倒“V”形。W4 的竖向土压力值在明洞中心位置处达到了最大值 771 kPa。W5 的竖向土压力曲线呈“W”形。W5 的竖向土压力值从两边向中间递减,在明洞

两侧到达最小值 270 kPa,之后土压力值从明洞两侧向明洞中心开始回升为 346 kPa,较 W4 减少了 55.12%。蠕变稳定时,W6 呈“U”形,从两边向中间递减,明洞顶部的应力集中消失,在明洞位置处达到最低点 246 kPa,并且在明洞范围内平缓。

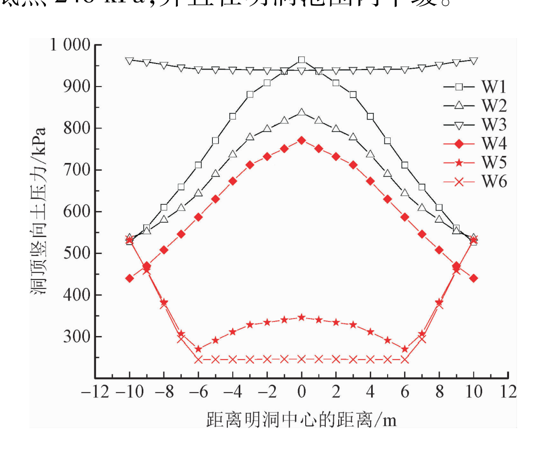


图 4 明洞上方竖向土压力

Fig. 4 Vertical earth pressure above HFCCT

对比分析可得,对于黄土填料和砂砾石填料,回填完成时 RLC 减载层都起到了减载作用,尤其砂砾石填料,减载作用十分明显。在蠕变稳定后,RLC 减载层对黄土填料的减载作用消失,竖向土压力值趋于平缓。但对于砂砾石填料,减载作用继续增大。可以发现,为了保证 RLC 减载层的长期减载作用,应采用蠕变性能不显著的填料进行高填方回填。

2.1.3 明洞上方竖向土压力随时间的变化

为了研究明洞上方的竖向土压力随时间的变化规律,本节对 *A-A* 截面中点(点 *a*)处的压力值进行分析,如图 5 所示。

对于黄土填料,在蠕变初期,压力值波动十分明显,然后随着蠕变的进行趋于稳定。其中,减载模型的洞顶竖向土压力峰值晚于未减载模型 30 个月出现,且明显小于未减载模型。可以看出,对于黄土填料,明洞顶部受到的是可变荷载,随着蠕变的进行,周期性消失,荷载稳定。同时,在填土完成后的某一时刻,未减载模型的洞顶竖向土压力大于回填完成时和蠕变稳定时的土压力,设计时应予以考虑。而 RLC 减载层在蠕变前期的减载作用明显,随着蠕变的进行,减载作用变小,洞顶土压力逐渐回升。对于砂砾石填料,在未添加 RLC 减载层时,由于砂砾石的蠕变性能不显著,明洞上方的竖向土压力不随蠕变时间进行改变;添加 RLC 减载层后,明洞顶的竖向土压力显著减小,并且随着时间的增加,减载效果继续增加,直到 RLC 减载层蠕变稳定后趋于平稳,并且减载效果不会消失,这进一步表明了 RLC 减载层更适合在蠕变性能不显著的填料中发挥减载作用。

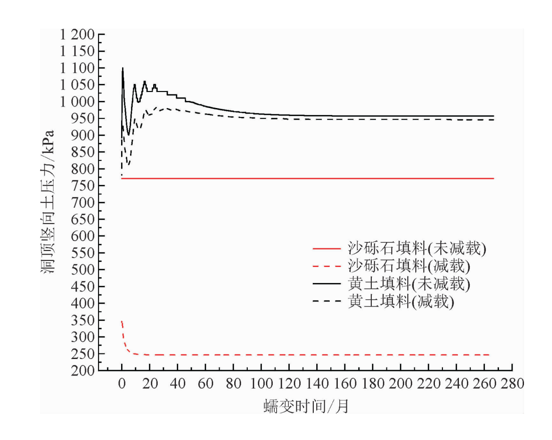


图 5 洞顶土压力时间变化曲线

Fig. 5 Time curve of earth pressure above HFCCT

2.2 位移

2.2.1 回填土的竖向位移

回填填料的竖向位移云图如图 6 所示,图 6(a)~图 6(f)分别对应表 1 中 W1~W6。

对于黄土填料,可看出图 6(b)相比较于图 6(a),由于 RLC 减载层的压实度小于填料的压实度,所以会少量增加明洞顶上部填料的竖向位移,产生位移可以分散明洞上方的荷载。比较图 6(c)和图6(b),位移进一步增多,表明在蠕变过程中,RLC 减载层被压实速度快于黄土填料,当两者压实度相同时,减载作用消失,但填料蠕变会继续进行,竖向位移进一步大幅度增加,导致洞顶的竖向土压力回弹上升。

对于砂砾石填料,图 6(e)相比较于图 6(d),明洞上部的填料位移明显增加,并且在 RLC 减载层顶部的位置处出现了位移集中部分,带动其周围产生很大的向下位移,可以有效地分散土压力,起到良好的减载作用。图 6(f)仅比图 6(e)中的位移集中区域变多,但分布规律并没有改变。这表明,蠕变完成后,对于砂砾石填料,位移增加不明显,但 RLC 减载层的减载效果不会消失。

竖向位移

(a) W1　　(b) W2

(c) W3　　(d) W4

(e) W5　　(f) W6

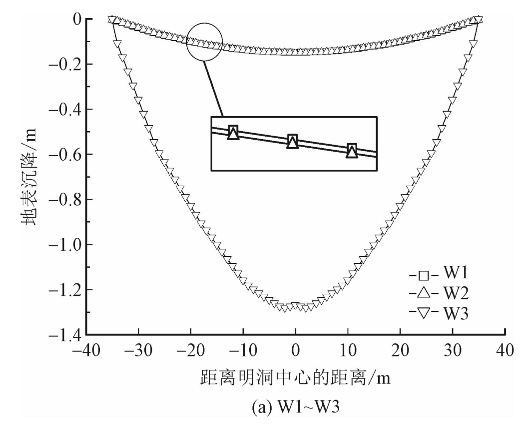
图 6　竖向位移分布云图(单位:m)

Fig. 6　Cloud diagrams of vertical displacement distribution(unit:m)

2.2.2　地表的竖向位移

W1 ~ W6 的 *C-C* 截面的地表竖向位移分布规律如图 7 所示。

由图 7 可知,对于 W1 ~ W6,地表竖向位移曲线都呈“U”形,这是由于边坡会限制填料的下滑,越远离边坡,地表的竖向位移值越大。



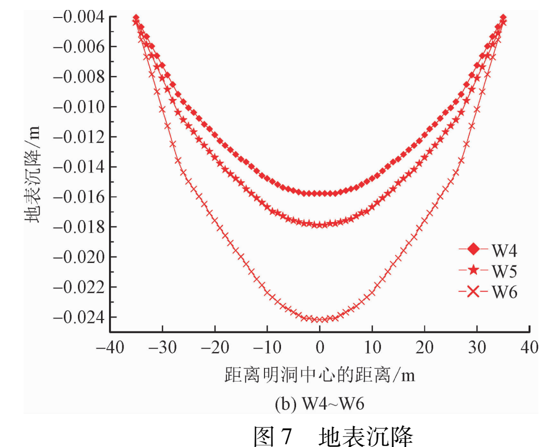


图 7　地表沉降

Fig. 7　Vertical displacement of the ground

对于黄土填料,因为黄土填料的杨氏模量跟 RLC 减载层的杨氏模量相似,所以在回填完成时,W1 和 W2 的曲线基本一致,地表产生了少量的竖向位移。当蠕变完成时,地表的竖向位移增加明显,尤其在明洞中心位置处,W3 比 W2 的竖向位移值多

1.12 m。对于砂砾石填料,它的地表位移远小于黄土填料。W5 的地表竖向位移值要高于 W4,尤其是在明洞中心位置比 W4 多 0.002 1 m,这说明砂砾石填料回填完成时,RLC 减载层增加了地表竖向位移。

当蠕变稳定时,砂砾石填料的竖向位移值明显增加,W6 在明洞中心比 W5 增加 0.06 m,表明随着蠕变的进行,砂砾石填料的地表竖向位移同样也会增加。

2.2.3 明洞上方填土的竖向位移

W1 ~ W6 的 *B-B* 截面的明洞上方填土的竖向位移分布规律如图 8 所示。

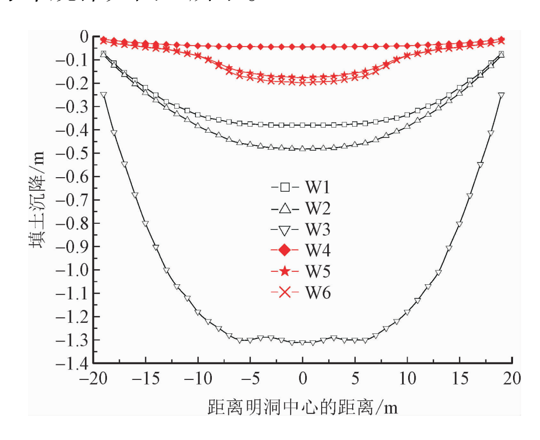


图 8 明洞上方填土沉降

Fig. 8 Vertical displacement of the filler above HFCCT

由图 8 可知,对于黄土填料,W2 的位移值大于 W1,尤其在洞顶是 W1 的 1.2 倍,这表明黄土填料回填完成时,RLC 减载层会少量增加明洞上方填料的竖向位移,产生的位移可以分散洞顶的竖向土压力,起到减载的作用。当蠕变完成时,在明洞顶中心位置处,W3 比 W2 多出 0.8 m。

对于砂砾石填料,由于蠕变性不显著,所以明洞上方填土的竖向位移值均小于黄土填料,并且 W4 呈现出一条直线。与黄土填料相比,砂砾石填料回填完成时,W5 洞顶处位移值是 W4 的 4 倍,可以更大限度的分散明洞上方的竖向土压力。当蠕变稳定时,明洞顶与其两侧的位移差距将进一步扩大,RLC 减载层蠕变而分散的明洞上部竖向土压力不会消失,分担作用将继续增大。

3 参数分析

由以上结果可得,随着蠕变的进行,RLC 减载层对土压力以及位移都有所影响。本节主要讨论 RLC 减载层某个参数的改变对于蠕变前后 *A-A* 截面明洞范围内的平均竖向土压力的影响。所涉及改变的参数具体如下。

RLC 减载层的宽度:$W = 6.4$ m(0.5 倍的洞宽)、12.8 m(1 倍的洞宽)、19.2 m(1.5 倍的洞宽)、25.6 m(2 倍的洞宽);

RLC 减载层的高度:$H = 5$、10、15、20 m;

RLC 减载层的位置(从明洞的顶部到 RLC 填土层的底部的距离):$D = 0.0$、2.5、5.0、7.5、10.0 m。

3.1 RLC 减载层的宽度对于明洞上方竖向土压力的影响

图 9 为竖向土压力与 RLC 减载层的宽度之间的关系。

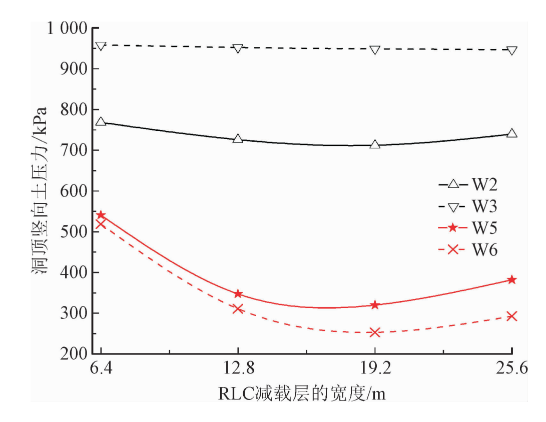


图 9 RLC 减载层的宽度与竖向土压力的关系

Fig. 9 Relationship between the width of the RLC layer and the vertical earth pressure

由图 9 可知,对于 W2 和 W5,回填完成时,若 RLC 减载层的宽度从 6.4 m 增加到 19.2 m,土压力随着宽度的增加而减小,若进一步增加宽度,土压力呈现出上升趋势,尤其砂砾石填料更为明显。蠕变稳定时,减载消失,土压力回弹,W3 呈现出一条直线,数值均大于 W2,并且洞顶平均竖向土压力不受 RLC 减载层宽度的影响。对于砂砾石填料,W6 的土压力值要小于 W5,并且 W6 呈现出与 W5 一样的变化规律,这表明蠕变稳定时,减载作用会继续增大。另外,W6 和 W5 之间的差值随着 RLC 减载层宽度的增加而增加,这表明 RLC 减载层的宽度越大,蠕变对洞顶平均竖向土压力的影响越大。

3.2 RLC 减载层的高度对于明洞上方竖向土压力的影响

图 10 为竖向土压力与 RLC 减载层的高度之间的关系。

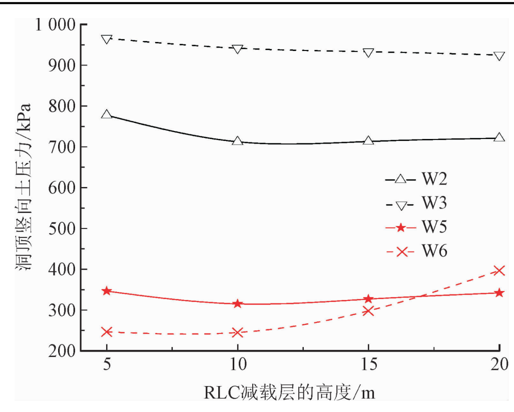


图 10　RLC 减载层的高度与竖向土压力的关系

Fig. 10　Relationship between the height of the RLC layer and the vertical earth pressure

由图 10 可知,对于 W2 和 W5,回填完成时,RLC 减载层的高度从 5 m 增加到 10 m 时,土压力随着高度的增加而缓慢减小;若高度进一步增加,土压力缓慢递增。蠕变稳定时,W3 的曲线趋于平缓。对于砂砾石填料,若 RLC 减载层高度在5 m和 17. 5 m 之间,W6 的土压力值要小于 W5,并且 W5 和 W6 的差值逐渐减小,若高度大于 17. 5 m,W6 数值反超 W5。这说明蠕变完成时,RLC 减载层的高度越大,蠕变对洞顶平均竖向土压力的影响越小,并且高度大于 17.5 m 时,RLC 减载层的作用消失,竖向土压力会回弹。

3.3　RLC 减载层的位置对于明洞上方竖向土压力的影响

图 11 为竖向土压力与 RLC 减载层的位置之间的关系。

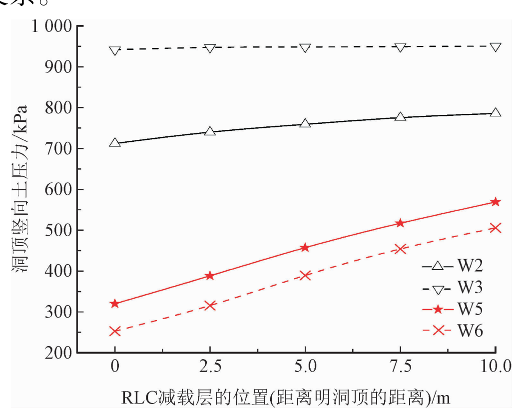


图 11　RLC 减载层的位置与竖向土压力的关系

Fig. 11　Relationship between the location of the RLC layer and the vertical earth pressure

由图 11 可知,对于黄土填料,随着 RLC 减载层与明洞顶的距离的增加,W2 的土压力缓慢增加,距离洞顶 10 m 时,仅增加了 5. 6% ;同 3. 1 节和 3. 2 节一样,W3 呈现出平滑的曲线,表明蠕变稳定时,减载作用消失,土压力回弹。对于砂砾石填料,W5 和 W6 的变化趋势相同,随着距离的增加,土压力明显增加,并且 W5 和 W6 之间的差值几乎不变,这表明当 RLC 减载层在明洞顶的位置变化时,蠕变对土压力的影响一致。

从以上可得,当填料回填完成时,不管填料是黄土还是砂砾石,当 RLC 减载层宽度为 19. 2 m(1. 5 倍洞宽)、高度为 10 m(0. 9 倍洞高)、且位置距离明洞洞顶 0 m(直接放置在明洞顶部)时,洞顶平均土压力可以取得最佳的减载效果,这与 VASLESTAD 等[8,17,20]研究的规律相同。然而,当填料蠕变完成时,对于黄土填料,RLC 减载层的作用消失,明洞上方的平均竖向土压力回弹;对于砂砾石填料,RLC 减载层的减载作用进一步增大,且达到最佳减载效果时 RLC 减载层参数的取值与填料回填完成时一致。

4　结　论

本研究利用有限差分软件 FLAC3D,在考虑蠕变时间和 RLC 减载层的情况下,对比了填料为黄土和砂砾石的高填方明洞顶竖向土压力和位移的变化情况,并进一步研究了 RLC 减载层的宽度、高度和位置对蠕变前后洞顶土压力带来的影响,结论如下。

1)填土完成时,RLC 减载层的设置可有效减少洞顶土压力。工后,若填料的蠕变性能显著,减载作用最终会消失,洞顶土压力回弹;若填料的蠕变性能不显著,减载作用会逐渐增大,并且不会消失。为了保证高填方明洞的长期安全性和减载效果的长期有效性,采用的填料不应具有显著的蠕变特性。

2)填土完成时,RLC 减载层通过增加明洞顶部的填料相对竖向位移实现减载。工后,若填料蠕变性能显著,RLC 减载层和填料的相互作用使得 RLC 减载层短期内压实,明洞两侧的填料随着蠕变发生明显沉降,地表竖向位移明显增大,RLC 减载层丧失减载能力;若填料蠕变性能不显著,仅是 RLC 减载层单方面的蠕变作用,将导致明洞顶部的填料竖向位移继续增加,而地表竖向位移增加量较少,从而使得 RLC 减载层具有长期减载效果。

3)填土完成时,RLC 减载层的宽度、高度和位置对其减载作用影响十分明显,且存在一个最优值使得减载作用最好。若填料蠕变性能显著,RLC 减载层参数的变化对洞顶土压力的影响将最终消失;

若填料蠕变性能不显著,减载层参数的变化对洞顶土压力的影响将不会消失,减载作用将会进一步增大,另外,RLC 减载层参数的最佳取值与填料回填完成时一致。

参考文献:

[1] MARSTON A. The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments[C]//Proceedings of the Ninth Annual Meeting of the Highway Research Board Held. Washington: Highway Research Board,1930:138-170.

[2] MARSTON A,ANDERSON A O. The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[Z]. Ames:Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts. 1913.

[3] LARSEN N G,HENDRICKSON J G. A practical method for constructing rigid conduits under high fills[C]//Proceedings of the 41st Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington: Highway Research Board,1962:273-280.

[4] TAYLOR R K. Induced-trench method of culvert installation[C]// 52nd Annual Meeting of the Highway Research Board,Washington: Highway Research Board,1973:15-31.

[5] MCAFFEE R P,VALSANGKAR A J. Geotechnical properties of compressible materials used for induced trench construction[J]. Journal of testing and evaluation,2004,32(2):143-152.

[6] SLADEN J A,OSWELL J M. The induced trench method—a critical review and case history[J]. Canadian geotechnical journal, 1988,25(3):541-549.

[7] SPANGLER M G. Long-time measurement of loads on three pipe culverts[J]. Highway research record,1997,443(1):1-14.

[8] VASLESTAD J,JOHANSEN T H,HOLM W. Load reduction on rigid culverts beneath high fills:long-term behavior[J]. Transportation research record,1993,1415(8):58-68.

[9] SUN L C,HOPKINS T C,BECKHAM T L. Long-term monitoring of culvert load reduction using an imperfect ditch backfilled with geofoam[J]. Transportation research record,2011,2212(1):56-64.

[10] 葛苗苗,李宁,张炜,等. 黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(3):745-753.
GE Miaomiao,LI Ning,ZHANG Wei,et al. Settlement behavior and inverse prediction of post-construction settlement of high filled loess embankment[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2017,36(3):745-753(in Chinese).

[11] 张豫川,高飞,吕国顺,等. 基于黄土蠕变试验的高填方地基沉降的数值模拟[J]. 科学技术与工程,2018,18(30):220-227.
ZHANG Yuchuan,GAO Fei,LÜ Guoshun,et al. Numerical simulation of high fill foundation settlement based on creep test of loess [J]. Science technology and engineering,2018,18(30):220-227 (in Chinese).

[12] 朱才辉,李宁. 基于黄土变形时效试验的高填方工后沉降研究[J]. 岩土力学,2015,36(10):3023-3031.
ZHU Caihui,LI Ning. Post-construction settlement analysis of loess-high filling based on time-dependent deformation experiments[J]. Rock and soil mechanics,2015,36(10):3023-3031(in Chinese).

[13] 李盛,马莉,王起才,等. 高填明洞土压力计算方法及其影响因素研究[J]. 中国铁道科学,2016,37(5):41-49.
LI Sheng,MA Li,WANG Qicai,et al. Calculation method and influencing factors for earth pressure of high fill open-cut tunnel[J]. China railway science,2016,37(5):41-49(in Chinese).

[14] 马莉,李盛,王起才,等. 沟槽式高填黄土明洞卸载模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(5):1065-1071.
MA Li,LI Sheng,WANG Qicai,et al. Unloading model test on open cut tunnels in high filled loess trench[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2016,35(5):1065-1071(in Chinese).

[15] 匡亮. 基于土压力集中效应的超厚填土明洞荷载计算方法研究[J]. 土木工程学报,2017,50(增刊2):192-197.
KUANG Liang. Study on the earth pressure load theory for open cut tunnels beneath super high fill based on earth pressure concentration effect[J]. China civil engineering journal,2017,50(S2):192-197(in Chinese).

[16] 贾聂宇驰,李盛,李智鹏,等. 基于有限差分法的高填黄土明洞土体蠕变分析[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(8):2046-2054.
JIANIE Yuchi,LI Sheng,LI Zhipeng,et al. Analysis on soil creeping for high-filled cut-and-cover tunnel based on finite difference method[J]. Journal of railway science and engineering,2020,17 (8):2046-2054(in Chinese).

[17] LI S,HO I H,MA L,et al. Load reduction on high-filled cut-and-cover tunnel using discrete element method[J]. Computers and geotechnics,2019,114:103149.

[18] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道施工规范:TB 10204—2002 [S]. 北京:中国铁道出版社,2002.

[19] MEGUID M A,HUSSEIN M G,AHMED M R,et al. Investigation of soil-geosynthetic-structure interaction associated with induced trench installation[J]. Geotextiles and geomembranes,2017,45 (4):320-330.

[20] KIM K,YOO C H. Design loading on deeply buried box culverts [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2005,131(1):20-27.

(编辑 吕茵)